



O POTENCIAL DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS À EDIFICAÇÃO E INTERLIGADOS À REDE ELÉTRICA EM CENTROS URBANOS DO BRASIL: DOIS ESTUDOS DE CASO

**(1)Isabel Salamoni, (1) Ricardo Ruther, (1)Paulo Knob, (1)Clarissa Zomer,
(2)Antônia Sônia Cardoso Diniz**

isamoni@labeee.ufsc.br

(1) Universidade Federal de Santa Catarina

(2) CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

RESUMO

O sistema fotovoltaico integrado à edificação e interligado à rede elétrica é um exemplo de fonte geradora de energia ideal para aplicação em áreas urbanas, principalmente em países ensolarados. Além de gerar energia onde é necessário, ele faz uso de espaços já existentes (envelope da edificação). Aspectos ambientais e o crescente aumento da demanda energética mundial têm contribuído para a aceleração e desenvolvimento desta fonte alternativa de energia. Este artigo apresenta um estudo detalhado do potencial do sistema fotovoltaico (FV) em áreas urbanas de duas capitais do Brasil, Florianópolis-SC e Belo Horizonte-MG. Para cada uma foram escolhidos dois setores urbanos: um residencial (construções horizontais) e outro central (construções densas e verticais). Em cada um foi calculado o potencial de geração FV, utilizando o sistema integrado na cobertura das edificações, e contrastado este valor com os respectivos consumos energéticos. Assim, foi possível quantificar a contribuição que o sistema poderá oferecer em cada caso. Os estudos mostraram bons resultados em termos de geração fotovoltaica e redução da curva de carga. A utilização do sistema em cada setor poderá auxiliar na rede elétrica de diferentes formas: tanto como uma fonte geradora de energia que poderá contribuir com a redução da sobrecarga da rede em alimentadores específicos; quanto como uma pequena usina capaz de diversificar a matriz energética e auxiliar em situações de sobrecarga dos alimentadores de áreas adjacentes. A aplicação deste último caso é importante em regiões que necessitam de energia complementar, mas que não possuem área de cobertura disponível para a implementação dos módulos solares.

Palavra Chave: Energia fotovoltaica, pico de demanda, consumo energético e energia renovável.

1. INTRODUÇÃO

A demanda mundial de energia vem crescendo continuamente. Em parte, isto acontece porque as populações e suas necessidades vêm crescendo e mais indústrias, serviços e empregos são gerados. Além destes fatores, uma parcela é gerada pelo desperdício de energia. Este crescimento da demanda energética em curto prazo gerou a necessidade de medidas de racionamento em todo o país.

Dados fornecidos pelo MME (2000), indicam que o consumo de energia não está ligado apenas ao crescimento econômico. O crescimento da população e a maior inserção de camadas pobres da população ou novas áreas geo econômicas na chamada economia de mercado, induzem a aumentos no uso de energia, mesmo em anos de pequeno desenvolvimento econômico.

O sistema elétrico brasileiro é bastante complexo e extremamente interligado, possuindo um dos maiores e mais complexos parques geradores do mundo, com capacidade instalada de geração em torno de 80 GW, sendo cerca de 93,2% de base hidráulica (PINHEIRO; PINHEL, 2001).

A geração de energia elétrica convencional é centralizada e distante do ponto de consumo, isso faz com que o sistema gere perdas na distribuição, aumentando os custos da produção da energia e causando danos às concessionárias e ao meio ambiente.

No entanto, a geração distribuída oferece inúmeras vantagens ao setor elétrico, uma vez que a disposição da unidade de geração é próxima da carga, além disso, permite uma maior diversificação das tecnologias empregadas para a produção de energia (RODRIGUES, 2002).

As necessidades de energia elétrica, advindas da sociedade moderna, e os altos custos provenientes do não suprimento desta energia, colocam as concessionárias diante da opção de aumentar a oferta mediante a construção de novas fontes de geração e as obras de transmissão e distribuição correspondentes. Por outro lado, os autores avaliam as restrições de ordem financeiras, ambientais e sociais, pois as grandes obras de geração e transmissão, necessárias face às imposições da economia de escala, resultam na utilização de grandes extensões territoriais para gerar e transmitir energia elétrica (BORENSTEIN; CAMARGO, 1997).

Dados da ELETROBRÁS/PROCEL (2000) relatam que as reservas de combustíveis fósseis de boa qualidade no Brasil não são grandes e que as reservas de petróleo são avaliadas como suficientes para 22 anos. O potencial hidrelétrico do Brasil, aproveitando somente 23%, tem sua maior capacidade na região amazônica, onde a inundação de enormes áreas para a construção de reservatórios das hidrelétricas poderia trazer como resultado uma catástrofe ambiental.

Experiências dos Estados Unidos e de outros países desenvolvidos têm demonstrado que, em longo prazo, a prevenção da poluição através da diminuição de resíduos e de uma produção com tecnologias mais limpas e eficientes, é mais sensata, tanto na relação custo benefício, como também para o próprio meio ambiente, se comparado com tecnologias tradicionais.

Aliado a estes fatores surge, cada vez mais, a necessidade da utilização de uma fonte renovável de energia, de forma não poluente e sustentável.

Os sistemas solares fotovoltaicos, integrados à edificação e interligados à rede elétrica estariam auxiliando na redução deste grande impacto ambiental, causado pela devastação de áreas para a implementação de grandes obras de geração de energia.

A tecnologia fotovoltaica é vista por muitos, como um caminho ideal para a geração de energia, através de uma fonte inesgotável e não poluente. É um método de produção de energia sustentável e amigável ao meio ambiente, trazendo benefícios tanto ambientais quanto energéticos, uma vez que o material ativo na maioria dos painéis é o silício, que conforme Hammond (1992), é o segundo elemento mais abundante na superfície terra.

Baseado no fato que o total de irradiação incidente na terra é de 1.2×10^{14} kW, isso corresponde a 10 000 vezes mais do que a demanda mundial em todo ano de 2002 (HAMAKAWA, 2002), a conversão direta da irradiação do sol em eletricidade tem um número significativo de vantagens. Além utilizar uma fonte renovável e abundante de energia, o sistema é silencioso, estático e sem nenhuma depleção de materiais, que converte diretamente a energia do sol em energia elétrica, e vem sendo, cada vez mais, utilizada por países industrializados.

A energia elétrica proveniente de fontes renováveis de pequena escala é vista como opção, em diferentes níveis, por diversos países. Dentre eles a Alemanha, Espanha, Japão e Estados Unidos. No Brasil a discussão da inserção dessas fontes ainda é muito carente e necessita de uma abordagem mais aprofundada. Nos últimos dez anos, a aplicação dominante da tecnologia passou dos sistemas fotovoltaicos isolados para os pequenos geradores fotovoltaicos, conectados à rede; primeiramente a partir de grandes centrais e posteriormente, de forma distribuída, através de sistemas menores (OLIVEIRA, 2002).

A integração dos módulos fotovoltaicos com a edificação apresenta vantagens de custos que torna este conceito atrativo tanto para regiões urbanizadas tanto para regiões menos densamente populosas. O sistema pode ser implementado nas edificações, ao longo de estradas ou em áreas terrestres, com a possibilidade de combinar produção de energia com outra função da edificação.

O primeiro degrau fundamental em qualquer aplicação do sistema fotovoltaico interligado à rede elétrica e integrado à edificação é maximizar a eficiência energética através da carga ou demanda das

edificações. Os sistemas de cobertura ou de fachada podem prover *R- Value* para diminuir a transferência térmica. Janelas, coberturas transparentes e fachadas podem ser projetadas para aumentar a iluminação natural no interior dos espaços (EIFFERT; KISS, 2004).

A iluminação é uma das maiores fontes elétricas usadas na maioria dos prédios comerciais. Os módulos são facilmente adaptados para a transmissão da luz natural, evitando assim este consumo. Além disso, a utilização dos módulos como elementos de sombreamento têm obtido grande sucesso, uma vez que controla a passagem excessiva de calor e iluminação no ambiente, minimizando os custos adicionais para sombreamentos e minimizando o consumo de energia em aparelhos condicionadores de ar (BAZILIAN, 2001).

A pesquisa integrada da conservação de energia, eficiência energética, design do envelope da edificação e tecnologia fotovoltaica, maximiza a economia de energia e cria novas oportunidades para o uso de sistemas fotovoltaicos integrados na edificação.

A utilização da energia elétrica gerada por sistemas fotovoltaicos, em alguns casos, onde as curvas de carga e de geração fotovoltaicas são coincidentes, pode auxiliar na redução do pico de consumo, sendo assim, pode servir como uma alternativa de GLD.

De um modo geral, o gerenciamento pelo lado da demanda (GLD) diz respeito ao planejamento, à implementação e ao acompanhamento daquelas atividades que modificam a curva de carga dos consumidores.

É, segundo Rütther (2004), de acordo com o princípio de sincronicidade, em que geração e consumo ocorrem simultaneamente; a energia elétrica gerada em alguns períodos do dia tem um valor maior para a concessionária do que em outros períodos onde a demanda não é crítica. Desta forma, o sistema fotovoltaico integrado à edificação e interligado na rede elétrica pública alivia o sistema de T & D (transmissão e distribuição) da concessionária elétrica, diminuindo custos na geração de energia e sobrecarga da rede nos horários de pico.

Os sistemas solares vêm tomando impulso crescente no mercado energético. A indústria fotovoltaica vem crescendo de 30-40%/ano, desde 1996 com os subsídios governamentais e programas de incentivo (GREEN, 2003).

Atualmente, existem no mercado várias tecnologias fotovoltaicas, baseadas em diferentes elementos. Em termos de aplicações terrestres destacam-se as células solares de silício cristalino (c-Si), o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H ou a-Si), o telureto de cádmio (CdTe) e outros compostos relacionados ao dissulfeto de cobre e índio. Neste último grupo, segundo Rütther (2004), aparecem elementos altamente tóxicos e raros. Este fator fez com que surja um obstáculo considerável na utilização mais acentuada destas tecnologias em alguns países.

Vários fatores podem influenciar no rendimento dos módulos, como a radiação solar, que depende fundamentalmente da localização geográfica da instalação, de condições climáticas, bem como de sua inclinação e orientação. A temperatura dos painéis, o sombreamento parcial, as resistências dos condutores e o estado de limpeza dos painéis também influenciam a performance do sistema gerador fotovoltaico (SICK et al, 1996).

A degradação do sistema fotovoltaico com o aumento das temperaturas tem sido, profundamente discutida. Cada vez mais, pesquisadores estão estudando o melhor design do sistema para evitar este super aquecimento.

As células monocristalinas e policristalinas têm coeficientes de temperaturas negativos de aproximadamente 0.4%/ C, enquanto que as células de silício amorfo têm coeficientes positivos, em torno de 0.2%/ C. Células de silício amorfo apresentam excelentes características térmicas, que são idealmente absorvidas pelos módulos fotovoltaicos. Outro benefício é que este material pode ser depositado diretamente sobre grandes superfícies e com uma variedade de substratos (BAZILIAN,2001).

A produção da tecnologia dos filmes finos difere significativamente da dos módulos de silício cristalino, além de ter uma eficiência consideravelmente menor.

A tecnologia de filmes finos vem sendo cada vez mais utilizada, principalmente na integração do entorno construído, por apresentar uma maior diversidade de modelos e por possuir baixos custos de

produção. Hoje, estão disponíveis no mercado painéis flexíveis, inquebráveis, mais leves, semitransparentes, ou até mesmo com superfícies curvas, que podem substituir elementos de revestimento na edificação.

Mesmo com estas vantagens, a tecnologia do c-Si ainda é a mais tradicional, apresentando maior escala de produção a nível comercial. Ela possui maior eficiência e se consolidou no mercado pela sua confiabilidade e robustez, mas segundo Rütger (2004), as possibilidades de redução do seu custo já foram praticamente esgotadas.

Pesquisas estão sendo feitas para aumentar a eficiência dos painéis baseados em filmes finos, a fim de que, no futuro, sejam competitivos, em termos de eficiência, com os modelos baseados em silício cristalino.

Estudos realizados afirmam que no futuro, pesquisas e desenvolvimentos chegarão a eficiências excedendo 20%, que irão ser obtidas nas próximas décadas, utilizando silício baseado em filmes finos (LIN, 2000).

O sistema integrado, hoje em dia, faz parte do conceito de energia eficiente em residências do Japão, Alemanha e parte dos US. Futuramente, ele poderá ser visto em diversos edifícios públicos, residenciais e industriais.

No Brasil, a viabilidade está relacionada a incentivos tanto do governo quanto de empresas privadas, que como nos países desenvolvidos, financiam e promovem os projetos, com a finalidade de obter um maior desenvolvimento do país.

A presente pesquisa tem por finalidade verificar o potencial de geração de energia solar fotovoltaica em áreas urbanas de duas capitais do Brasil, Florianópolis-SC e Belo Horizonte-MG. A análise considera que toda a área útil das coberturas das edificações dos setores estudados seja coberta por painéis solares fotovoltaicos.

O estudo faz uma análise dos modelos de módulos fotovoltaicos, comercialmente disponíveis, que melhor se integram às edificações e às condições climáticas das regiões, verificando prós e contras de cada tecnologia. A escolha dos modelos foi feita de forma a suprir as necessidades do consumidor quanto à energia gerada, integração à edificação, resistência às condições climáticas da região, área de cobertura disponível, bem como as dimensões e eficiência do módulo.

2. MÉTODO APLICADO

Para a realização da pesquisa, foram selecionadas duas cidades brasileiras: Florianópolis e Belo Horizonte. As duas apresentam diferentes características, tais como: construtivas, de consumo energético, de níveis de radiação solar e de latitude local. Para cada uma foram selecionadas áreas urbanas, correspondentes a setores.

2.1. Setores das cidade de Florianópolis e Belo Horizonte

Foram selecionados dois setores da cidade de Florianópolis: um com característica residencial, basicamente formado por edificações horizontais e com grande área de cobertura disponível, situado na praia de Jurerê; e outro com característica comercial, formado basicamente por edificações verticais e com uma restrita área de cobertura disponível, situado em uma área central da cidade.

Analisando fotos aéreas e dados obtidos pelo plano diretor da cidade, foi possível observar a densidade de concentração das edificações em cada setor. A área residencial além de ser bastante horizontal e arborizada, possui recuos nas construções, tanto frontais quanto laterais, possibilitando assim, um menor sombreamento causado por edificações vizinhas. A área referente ao setor central é bastante vertical e estes recuos dificilmente existem, tornando esta área altamente densa e pouco arborizada. Como no setor Centro há um predomínio de verticalidade com alturas que variam de um a quatorze pavimentos, existe uma grande porcentagem de sombreamento nas coberturas, causada pelas edificações mais altas.

Na cidade de Belo Horizonte, foram analisados, também, dois setores: um central, formado basicamente por edificações com função comercial e com características construtivas bastante verticais, denominado Hiper Centro e outro formado basicamente por edificações residenciais com características construtivas horizontais, denominado Floresta.

Os dois setores observados apresentam taxa de ocupação de solo bastante elevada, fazendo com que estas regiões tornem-se altamente densas, e portanto, com grandes percentuais de sombreamento nas coberturas das edificações.

Para cada setor estudado das regiões de Florianópolis e Belo Horizonte, foram identificados os alimentadores que abastecem as áreas correspondentes, verificados seus consumos energéticos anuais, calculadas as áreas totais de cobertura para a implementação do sistema solar fotovoltaico e observados os respectivos picos de demanda.

2.2. Inclinação e orientação

Uma vez quantificadas as áreas das coberturas dos setores escolhidos, foi efetuado o cálculo de geração de energia fotovoltaica (FV) possível de ser produzida pelo sistema, considerando que toda a área de cobertura dos setores seja coberta por módulos fotovoltaicos. Foram realizados dois estudos de caso para cada cidade.

Através dos dados de radiação global horizontal, fornecidos pelo Laboratório de energia solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR), foi obtida a quantidade de radiação solar anual para a cidade de Florianópolis e para a cidade de Belo Horizonte, desconsiderando a inclinação das coberturas. Para isto, foram utilizados os dados de radiação global horizontal, pois primeiramente o estudo de geração de energia foi realizado considerando o ângulo de inclinação dos painéis de zero grau e, consequentemente, desvio azimutal também zero.

Este estudo teve como objetivo a obtenção de uma idéia global do potencial de geração fotovoltaica de cada setor nas duas cidades.

Depois de obtido o valor de geração fotovoltaico para inclinação de zero grau, foi realizado o segundo estudo de caso: coberturas com inclinação e orientação ideais, ou seja, inclinadas de acordo com a latitude local (27° Florianópolis e 20° Belo Horizonte) e voltadas para norte verdadeiro. Para este estudo, foram utilizados dados de radiação solar, baseados no plano inclinado do painel. Para a obtenção destes valores, foi utilizado o programa ¹RADIASOL.

2.3. Cálculo de radiação solar e geração de energia fotovoltaica

Para calcular a quantidade de radiação incidente em uma superfície, foi utilizado o programa RADIASOL, desenvolvido pela Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e disponível na página www.ufgrs.br. Os valores de radiação obtidos através do programa, são valores médios mensais em kWh/m²/dia. Calculados a partir do banco de dados de radiação solar disponibilizado pelo LABSOLAR (Laboratório de energia solar da Universidade Federal de Santa Catarina).

A potência instalada no sistema foi obtida em função da área de cobertura disponível e da eficiência do painel. (Eq.1)

$$P_{CC} = A_{DISPONÍVEL} * E_{FF} / 100 \quad (E.1)$$

P_{CC} corresponde à potência instalada (em kWp), $A_{DISPONÍVEL}$ à área de cobertura disponível para a implementação do sistema (em m²) e E_{FF} à eficiência do painel (em%).

A quantidade de energia fotovoltaica gerada pelo sistema foi obtida em função da potência instalada, da eficiência do sistema inversor e da irradiação incidente no plano do painel. (Eq.2)

$$E = N_{EL} * P_{CC} * G_{POA} \quad (E.2)$$

N_{EL} corresponde à eficiência do sistema inversor, com valor tipicamente 90%, P_{CC} à potência instalada e G_{POA} (em kWh/m²/dia) a quantidade de radiação incidente no plano do painel.

Para os dois estudos de caso, em cada região, foram considerados cinco modelos de módulos fotovoltaicos, assumidos como representativos das cinco principais tecnologias disponíveis no

¹ Programa de simulação das médias diárias mensais de radiação solar no plano do painel, tendo como variáveis as regiões estudadas, a orientação e a inclinação dos painéis.

mercado. Portanto, foram realizados, para cada setor, 10 simulações da relação área de cobertura disponível para a geração FV x consumo energético do setor considerado.

Como a performance dos módulos de a-Si é independente da temperatura de operação das células (RUTHER et al; 2003), estes são os únicos que não possuem coeficientes de temperatura negativos. A performance do restante das tecnologias depende da temperatura de operação das células e cada modelo de módulo possui um coeficiente de temperatura de operação diferente. Por este motivo, foi necessário recalcular as eficiências destas tecnologias, em função dos seus respectivos coeficientes e da temperatura de operação estimada. Para o cálculo da eficiência, considerando a variação desta com a temperatura (EFF_{NOCT}), foi considerada uma temperatura de operação dos módulos ($NOCT^2$) de $45^{\circ}C$. Nos padrões normais (STC) os módulos são etiquetados a uma temperatura de $25^{\circ}C$ (KURTZ, S.A et al, 2000).

A tabela 1 apresenta as eficiências das tecnologias utilizadas, considerando a temperatura padrão do módulo, ou seja, $25^{\circ}C$ e considerando a temperatura média de operação de $45^{\circ}C$ e seus respectivos coeficientes de temperatura.

Dados fornecidos pelo fabricante			NOCT ($^{\circ}C$)	EFF _{NOCT} (%)
Tecnologia	EFF _{STC} (%)	TCO _{EFF} (%/ $^{\circ}C$)		
m-Si	13,50	-0,40 ³	45	12,42
a-Si	6,30	0,00 ⁴	45	6,30
p-Si	11,60	-0,40 ⁵	45	10,67
CdTe	6,90	-0,20 ⁵	45	6,62
CIS	8,20	-0,45 ⁵	45	7,46

Tabela 2: Valores das eficiências das tecnologias utilizadas para os dois estudos de caso, nas regiões de Florianópolis e Belo Horizonte, considerando uma temperatura padrão de 25° (STC) e considerando uma temperatura média de operação de 45° .

3. RESULTADOS OBTIDOS

3.1. Cidade de Florianópolis

Para a cidade de Florianópolis foi observado que cada setor corresponde a um alimentador. Estes foram identificados como INE 02 (setor Jurerê) e ICO 07 (setor Centro).

A tabela 2 mostra os valores de consumo energético para os 12 meses do ano, referentes ao alimentador do setor Jurerê.

² NOCT do inglês Nominal Operating Cell Temperature, considera a eficiência dos módulos como função da temperatura do ambiente e da velocidade do vento, assumindo uma temperatura da célula de $44^{\circ}C$, que corresponde a uma temperatura ambiente de $20^{\circ}C$. (KURTZ, S.A et al, 2000)

³ Valores de eficiências (T_{COEFF}) segundo Nann e Emmery (1992).

⁴ Valor de eficiência (T_{COEFF}) segundo Rütther et al. (2004).

⁵ Valor de Eficiência (T_{COEFF}) segundo Sanyo (2004).

Tabela 2: Dados de consumo energético para o setor Jurerê (INE 02), da cidade de Florianópolis.

ALIMENTADOR INE 02			
Mês	Consumo (kWh/mês)	Mês	Consumo (kWh/mês)
Maio-2001	1.685.810	Novembro-2001	1.172.190
Junho-2001	1.224.230	Dezembro-2001	1.991.750
Julho-2001	1.380.500	Janeiro-2002	2.940.890
Agosto-2001	1.380.500	Fevereiro-2002	2.429.330
Setembro-2001	1.536.800	Março-2002	2.356.120
Outubro-2001	1.381.720	Abril-2002	1.827.280
Média	1.775.590		
Total (kWh/ano)	21.307.120,00		

Neste setor, os valores de consumo diferem significativamente entre si, devido ao fato de que o setor residencial não possui muitos moradores durante o ano, por estar localizado em uma praia, fazendo com que seu maior consumo ocorra nos meses de Dezembro a Março.

A tabela 3 apresenta os valores de consumo energético ao longo de doze meses do ano no setor Centro, alimentador ICO 07.

Tabela 3: Dados de consumo energético para o setor Centro (ICO 07), da cidade de Florianópolis.

ALIMENTADOR ICO 07			
Mês	Consumo (kWh/mês)	Mês	Consumo (kWh/mês)
Maio-2001	2.120.320	Novembro-2001	2.018.350
Junho-2001	1.761.050	Dezembro-2001	2.538.950
Julho-2001	2.057.960	Janeiro-2002	2.961.200
Agosto-2001	1.073.730	Fevereiro-2002	2.626.360
Setembro-2001	1.707.770	Março-2002	3.486.360
Outubro-2001	1.656.850	Abril-2002	2.820.730
Média	2.235.800		
Total (kWh/ano)	26.829.630,00		

No setor Centro, para o mês de março há um aumento significativo do consumo, isto se justifica pelo fato de que neste período os trabalhadores estão retomando as atividades, pois existe um predomínio de prédios comerciais, e ainda permanece calor, havendo um alto consumo de aparelhos condicionadores de ar.

Através dos valores de demanda foi possível identificar que o setor Jurerê, ou seja, alimentador INE 02., possui um pico noturno atingindo seu valor máximo por volta das 21 horas. Este horário de pico se justifica por ser um setor residencial e localizado na praia. Durante o dia, os consumidores permanecem a maior parte do tempo fora das residências, retornando à noite, provável horário de banho. Este pico atinge valor máximo durante esta atividade, devido ao fato de que o chuveiro elétrico é responsável pela maior parcela da demanda de energia elétrica de uma edificação.

O alimentador ICO 07, referente à área central, possui um pico diurno. A maior demanda ocorre entre as 9 horas e às 18 horas, diminuindo ao meio dia, horário correspondente ao almoço onde, possivelmente, os aparelhos de ar condicionado são desligados, e atingindo seu valor máximo por

volta das 14 horas, horário em que se retomam as atividades no setor comercial. Estes gráficos foram obtidos para os dias de maior consumo correspondente de cada setor.

A figura 1 é referente à curva de geração solar fotovoltaica para o mês de dezembro, período referente ao verão na região de Florianópolis.

GERAÇÃO FV DA PLANTA DA UFSC (Dia 02/12/01)

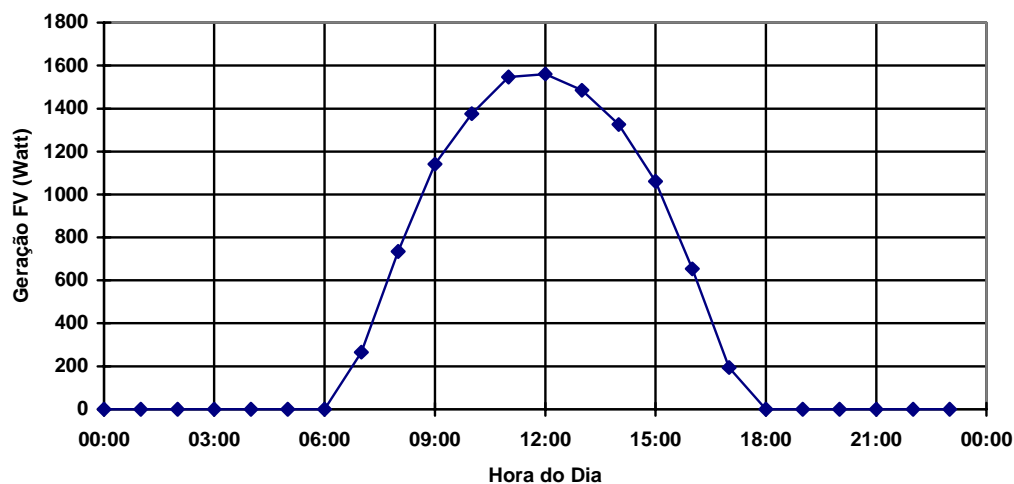


Figura 1: Curva de geração solar para um dia limpo do mês de dezembro (dia 02/12/01), medida na estação da Universidade Federal de Santa Catarina.

A geração solar no mês de dezembro ocorre das 6 horas até às 18 horas, atingindo seu valor máximo ao meio dia, horário correspondente a maior incidência solar.

Utilizando as equações E.1 e E.2, descritas na metodologia, através da utilização dos dados calculados de radiação solar e de área de cobertura referente a cada setor, bem como os valores fornecidos de consumo energético correspondentes e eficiência das tecnologias utilizadas, foi calculado o percentual de suprimento do consumo de cada setor, para os dois estudos de caso.

A tabela 4 apresenta estes valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Jurerê, para o primeiro e segundo estudo de caso, considerando que em toda área de cobertura deste, sejam instalados módulos fotovoltaicos.

Tabela 4: Valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Jurerê, utilizando as cinco tecnologias fotovoltaicas disponíveis, considerando os dois estudos de caso.

Estudos de Caso	Percentual de suprimento do consumo no setor Jurerê				
	m-Si	a-Si	p-Si	CdTe	CIS
1 ^o	217,71	120,00	185,14	111,43	125,14
2 ^o	230,46	126,98	195,91	117,92	132,43
% de variação entre os casos	5,80				

O sistema FV em todos os casos do setor Jurerê e com a utilização das cinco tecnologias, conseguiria suprir todo o consumo do setor e ainda poderia exportar a energia excedente, que no melhor caso chegaria a 130,10%. Desta forma, poderia além do benefício da energia gerada, auxiliar em outras áreas adjacentes, que não disponibilizam de área de cobertura suficiente para a implementação do sistema, como é o caso da região central da cidade, mostrada no exemplo anterior. Observou-se que a variação entre o caso ideal, ou seja, coberturas com inclinações iguais à latitude local e voltadas para o norte verdadeiro; e o primeiro caso, ou seja, coberturas horizontais e com desvio azimutal zero, é bastante pequena, chegando a 5,8%. Esta variação é a mesma para todas as tecnologias, porque este valor depende da radiação solar, que é a mesma para a região de Florianópolis.

A figura 2 mostra os de geração fotovoltaica, demanda de energia e demanda menos geração no setor INE 02, correspondente à área de Jurerê.

ALIMENTADOR INE 02

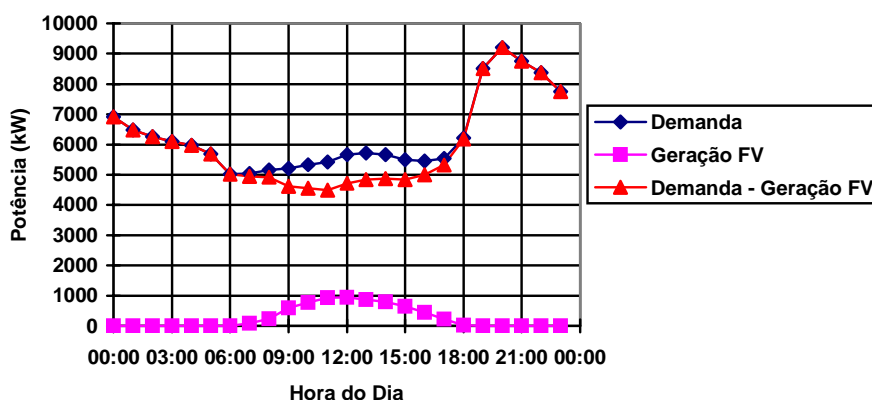


Figura 2: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração no setor Jurerê, considerando a potência instalada como 20% da demanda máxima histórica do setor.

Conforme a figura acima, o pico do setor Jurerê não coincide com o de geração fotovoltaica. O pico máximo deste setor ocorre à noite, por volta das 21 horas, enquanto que o pico de geração ocorre durante o dia. Portanto, sistema, não poderia contribuir para a redução do pico de demanda, desta área, pois as curvas de geração de energia e de demanda não são coincidentes. Por outro lado, como foi observado na tabela 4, o setor conseguiria gerar mais energia do que seu consumo, podendo assim, funcionar como uma mini-usina geradora de energia, que atuaria em paralelo com as centrais convencionais e iria auxiliar na redução da sobrecarga da rede em um alimentador adjacente.

Para o cálculo de geração FV do setor Centro, foram obtidos valores percentuais de suprimento de consumo bem menores que o setor Jurerê, devido a este possuir uma área de cobertura disponível menor para a implementação do sistema, principalmente por se tratar de uma área densa e vertical.

A tabela 5 apresenta estes valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Centro, considerando que em toda a área de cobertura deste, sejam instalados módulos fotovoltaicos.

Tabela 5: Valores percentuais de suprimento do consumo de energia no setor Centro, através da utilização de sistemas FV em toda a área de cobertura das edificações, considerando os dois estudos de caso e as cinco tecnologias FV disponíveis no mercado.

Estudos de Caso	Percentual de suprimento do consumo no setor Centro				
	m-Si	a-Si	p-Si	CdTe	CIS
1 ^o	154,42	83,64	131,32	79,03	88,76
2 ^o	163,46	90,10	139,00	83,86	93,96
% de variação entre os casos	5,80				

O sistema fotovoltaico interligado na rede elétrica do setor Centro conseguiria suprir todo o respectivo consumo com a utilização das tecnologias dos painéis baseadas em m-Si e p-Si, consideradas as mais eficientes. Com o restante das tecnologias, o sistema não conseguiria atingir a auto-suficiência, em termos de quantidade de energia.

A figura 3 mostra os de geração fotovoltaica, demanda de energia e demanda energética menos geração FV menos no setor ICO 07, correspondente ao setor Centro.

ALIMENTADOR ICO 07

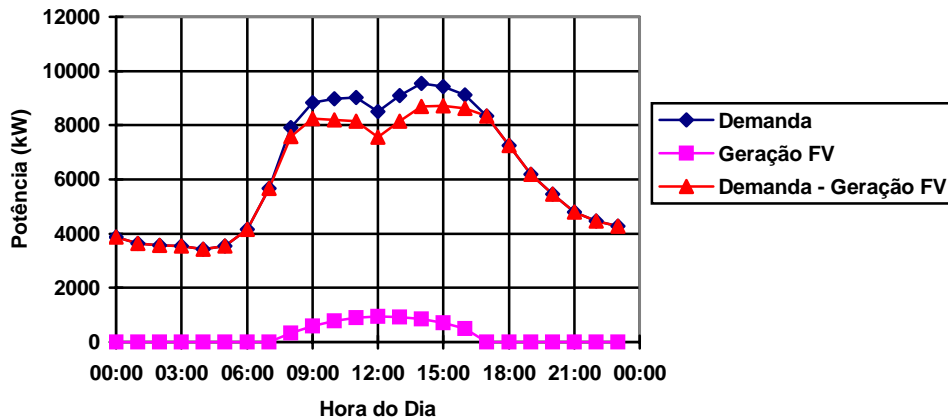


Figura 3: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração no setor Centro, considerando a potência instalada como 20% da demanda máxima histórica do setor.

A curva de pico diminui significativamente quando a geração fotovoltaica auxilia a rede elétrica convencional. Essa diminuição se deve ao fato de que os horários de pico coincidem com os horários de geração fotovoltaica nas áreas comerciais. Portanto, por mais que a geração fotovoltaica neste setor, utilizando toda a área de cobertura disponível das edificações, não supra o consumo total deste, como foi o caso de algumas tecnologias aplicadas, observado na tabela 5, ela poderia contribuir significativamente para a redução do pico de carga. Isto poderia trazer grandes benefícios à concessionária, tanto energéticos quanto econômicos. Desta forma, poderia vir a ser uma importante ferramenta no GLD (Gerenciamento pelo lado da demanda).

3.2. Cidade de Belo Horizonte

Para a cidade de Belo Horizonte foi observado que cada setor corresponde a mais de um alimentador. O setor Hiper Centro é abastecido pelos alimentadores BHBP 04, BHBP 09, BHBP 10, BHBP 13, BHBP 18, BHCN 01 e BHCN 02. O setor Floresta é abastecido pelos alimentadores BHBP 09, BHBP 13, BHCN 02, BHCN 05, BHCN 46, BHRH 05, BHRH 12, BHMR 13, BHSE 16, BHSE 19, BHSE 20.

A tabela 6 mostra os valores de consumo energético em cada alimentador dos setores Hiper Centro e Floresta. Estes valores correspondem à média anual mensal de consumo energético.

BAIRRO HIPER CENTRO		BAIRRO FLORESTA	
Alimentador	Consumo (kWh/mês)	Alimentador	Consumo (kWh/mês)
BHBP 04	1.804.737	BHBP 09	59.901
BHBP 10	1.488.421	BHBP 13	370.124
BHBP 13	316.825	BHCN 02	127
BHBP 18	12.564	BHCN 05	282.196
BHCN 01	4.825.243	BHCN 46	506.681
BHCN 02	2.129.001	BHHR 05	187.447
INDEFINIDO	22.295	BHHR 12	707.630
Média Mensal	10.599.086	BHSE 16	6.461
Total Anual	127.189.032	BHSE 19	470.263
		BHSE 20	838.922
		Média Mensal	3.429.752
		Total Anual	41.157.024

Tabela 6: Valores de consumo energético em cada alimentador dos setores da cidade de Belo Horizonte.

Nestes setores, os valores de consumo diferem significativamente entre si, devido ao fato de que o setor central possui atividades comerciais durante o dia, havendo assim, um grande consumo de aparelhos de ar condicionado. Como no setor Floresta há um predomínio de edificações residenciais, este consumo é menor.

Através dos valores de demanda do setor Hiper Centro, foi verificado o horário de maior valor de demanda, correspondente ao pico do setor. Este, ocorre das 9 horas até as 18 horas, atingindo seu máximo valor às 15 horas. Este setor possui um pico diurno por haver um predomínio de edificações com função comercial.

A área do setor Floresta apresenta um pico diurno, que ocorre entre as 9 horas e às 18 horas, atingindo seu máximo valor às 18 horas. Isto se deve ao fato de que neste setor há um predomínio de edificações residenciais, cuja maior parte do consumo de energia ocorre no período da noite.

Através da utilização das equações descritas anteriormente e dos dados radiação solar e de área de cobertura referente a cada setor, bem como os valores fornecidos de consumo energético correspondentes e eficiência das tecnologias utilizadas, foi calculado o percentual de suprimento do consumo de cada setor estudado, da cidade de Belo Horizonte, para os dois estudos de caso.

A tabela 7 apresenta estes valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Hiper Centro, considerando que em toda a área de cobertura deste, sejam instalados módulos fotovoltaicos.

Tabela 7: Valores percentuais de suprimento do consumo de energia no setor Hiper Centro, através da utilização de sistemas FV em toda a área de cobertura das edificações, considerando os dois estudos de caso e as cinco tecnologias FV disponíveis no mercado.

Estudos de Caso	Percentual de suprimento do consumo no setor Hiper Centro				
	m-Si	a-Si	p-Si	CdTe	CIS
1 ^o	74,02	40,89	62,94	37,88	42,54
2 ^o	77,84	42,90	66,19	39,84	44,74
% de variação entre os casos	5,10				

O sistema FV interligado na rede do setor Hiper Centro em nenhum dos casos e com nenhuma das cinco tecnologias FV analisadas conseguiria suprir todo o consumo energético correspondente, mas por se tratar de uma área com pico diurno, qualquer energia injetada na rede deste setor iria contribuir significativamente com a concessionária para redução do pico de demanda.

A figura 4 mostra os de geração fotovoltaica, demanda de energia e geração FV menos demanda energética no setor Hiper Centro.

A curva superior corresponde à curva de demanda, a inferior corresponde à geração solar fotovoltaica e a intermediária corresponde à demanda menos a geração FV.

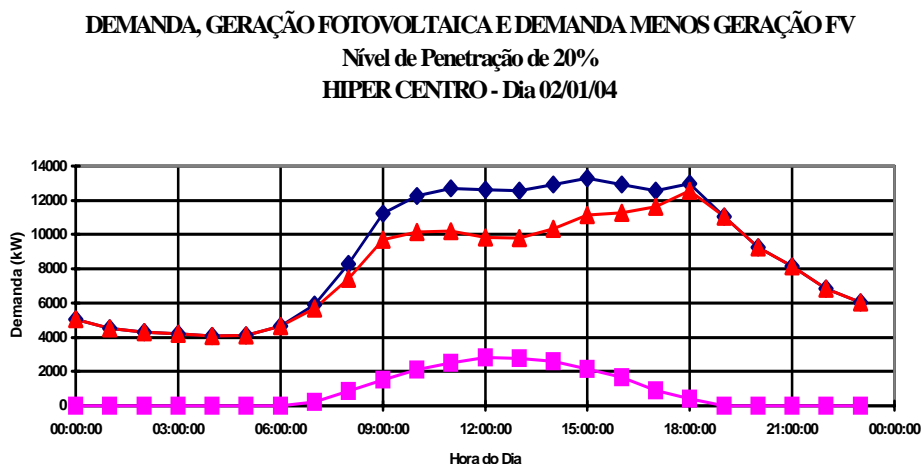


Figura 4: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no setor Hiper Centro, considerando como potência instalada 20% da demanda máxima histórica do setor (dia 02/01/2004).

Observou-se que a energia fotovoltaica gerada pelo sistema, se injetada em todos os alimentadores do setor, iria deslocar o pico de demanda das 16 horas para as 18 horas. Como neste horário a incidência solar é bastante pequena e a demanda ainda é alta, houve uma redução pouco intensa do pico, se comparado com o das 16 horas. Apesar de o efeito parecer pouco significativo, é importante salientar que haveria um benefício ao sistema de transmissão e distribuição que se soma ao valor da energia fotogerada propriamente. A quantificação destes benefícios deve ser vista com interesse pelas concessionárias no futuro.

Para o cálculo de geração FV do setor Floresta, foram obtidos valores percentuais de suprimento de consumo bem maiores do que os do setor Hiper Centro, devido a este possuir uma área de cobertura maior e um consumo energético menor.

A tabela 8 apresenta estes valores percentuais de suprimento do consumo energético do setor Floresta, considerando que em toda a área de cobertura deste, sejam instalados painéis fotovoltaicos.

Tabela 8: Valores percentuais de suprimento do consumo de energia no setor Floresta, através da utilização de sistemas FV em toda a área de cobertura das edificações, considerando os dois estudos de caso e as cinco tecnologias FV disponíveis no mercado.

Estudos de Caso	Percentual de suprimento do consumo no setor Hiper Centro				
	m-Si	a-Si	p-Si	CdTe	CIS
1 ^o	294,36	162,24	250,32	150,66	169,20
2 ^o	309,55	170,62	263,24	158,43	177,93
% de variação entre os casos	5,10				

O setor Floresta mostrou possuir uma grande área de cobertura disponível para a implementação de um sistema FV, de forma a suprir as respectivas necessidades energéticas. Em todos os casos estudados e com a utilização das cinco tecnologias analisadas o sistema conseguiria torna-se auto-suficiente, em termos de quantidade de energia.

A figura 5 mostra os de geração fotovoltaica, demanda de energia e geração FV menos demanda energética no setor Floresta.

A curva superior corresponde à curva de demanda, a inferior corresponde à geração solar fotovoltaica e a intermediária corresponde à demanda menos a geração FV.

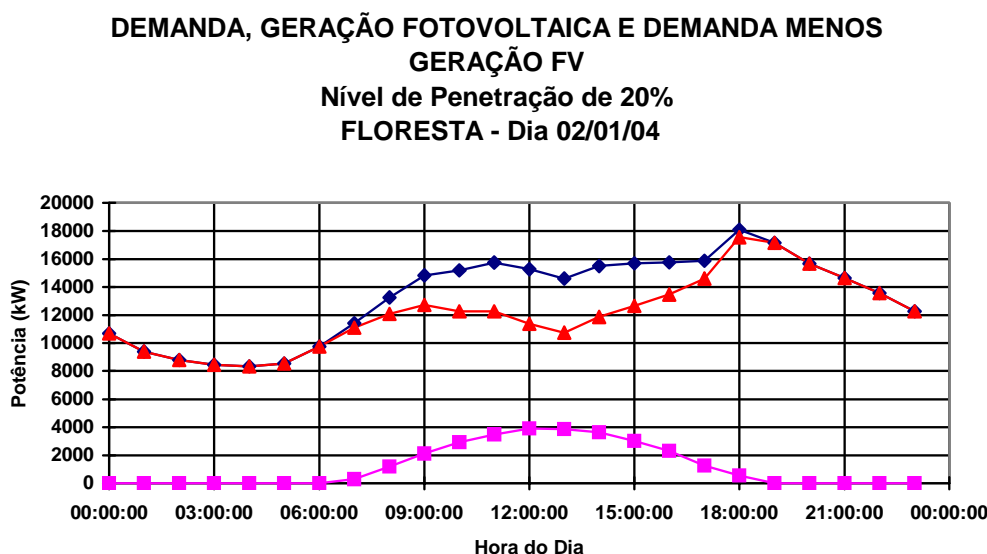


Figura 5: Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no setor Floresta, considerando como potência instalada 20% da demanda máxima histórica do setor (dia 02/01/2004).

Como o setor Floresta possui pico noturno, a geração fotovoltaica interligada na rede para esta área não iria trazer benefícios à concessionária em termos de redução da curva de pico, e sim em termos de energia gerada. Como foi observado na tabela 8, o setor conseguiria gerar mais energia do que seu consumo. Desta forma, o sistema poderia auxiliar, assim como no setor residencial da cidade de Florianópolis, na redução da sobrecarga da rede em alguma área adjacente que não possui área de cobertura disponível para o sistema. Assim, o sistema poderia funcionar como uma mini-usina geradora de energia, que atuaria em paralelo com as centrais convencionais e auxiliaria na redução da sobrecarga da rede em outro alimentador.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se com a presente pesquisa que a geração solar fotovoltaica integrada à edificação e interligada à rede elétrica pública traz inúmeros benefícios à concessionária, tanto de caráter energético quanto financeiro. Pelo fato de o sistema ser instalado próximo ao ponto de consumo, as perdas por transmissão e distribuição ocorrentes na geração centralizada convencional são eliminadas, fazendo com que aumente a eficiência energética da concessionária.

Em ambas as capitais observadas, o sistema fotovoltaico mostrou apresentar excelente eficiência em termos de geração de energia. Por mais que em alguns casos, este não seja auto-suficiente, em termos de quantidade de energia, haveria um benefício tanto para o sistema de transmissão e distribuição, quanto para a diminuição de sobrecarga da rede elétrica.

Os setores residenciais mostraram possuir uma grande área de cobertura disponível para a implementação de um sistema FV. Em todas as tecnologias aplicadas e estudos de caso realizados, o sistema conseguiria a auto-suficiência em termos de quantidade de energia e ainda poderia exportar o excedente para outras áreas. Desta forma, estes setores poderiam funcionar como mini-usinas geradoras, que estariam auxiliando na sobrecarga da rede em algum setor adjacente que não possuía área de cobertura disponível para a implementação do sistema.

Os setores centrais mostraram apresentar uma área de cobertura reduzida para a implementação de um sistema FV auto-suficiente. Por outro lado possuem um pico diurno, coincidente com o da geração

solar. Assim, qualquer energia injetada nestas áreas, iria trazer benefícios à concessionária, pois estaria reduzindo a curva de carga dos setores.

Os dois estudos de caso mostraram uma variação pouco intensa entre si, portanto a inclinação e a orientação dos módulos solares não são fatores limitantes para a implementação de um sistema FV eficiente.

Este estudo comprova que instalações solares fotovoltaicas integradas a prédios comerciais e interligadas à rede elétrica pública são um exemplo de aplicação ideal destes sistemas, onde os picos de consumo e de geração são muitas vezes coincidentes. A geração solar fotovoltaica atinge valores máximos, principalmente em períodos de calor intenso, onde a demanda energética nestas edificações aumenta de forma acentuada em consequência da utilização intensa de aparelhos de ar-condicionado, devido a que nestes horários, ocorre uma maior incidência solar. Desta forma, alivia o sistema de T & D (transmissão e distribuição) da concessionária elétrica.

O conhecimento do potencial deste sistema descentralizado no suprimento de energia junto ao ponto de consumo vai além da quantidade de energia que ele é capaz de produzir; a aplicação de plantas fotovoltaicas estratégicas em centros urbanos pode aumentar a capacidade da rede de distribuição local, auxiliando na redução do pico de carga.

Portanto, conhecendo a capacidade que uma planta fotovoltaica tem de gerar energia quando a demanda se eleva, esta pode não apenas servir como uma fonte geradora de energia, mas principalmente como uma planta capaz de aumentar a capacidade da rede elétrica local.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAZILIAN, D. N. Et al. Photovoltaic cogeneration in the built environment. *Solar Energy*, n. 71, 2001.

ELETROBRÁS; PROCEL. **Conservação de energia: Eficiência energética de instalações e equipamentos.** Itajubá, MG, Editora da EFEI, 2001.

GREEN A. M. Crystalline and thin film silicon solar cells: state of the art and future potential. *Solar Energy*, n.74, p. 181-192, 2003.

HAMAKAWA, Y. Solar PV energy conversion and the 21st century's civilization. *Solar Energy & Solar Cells*, n. 74, p. 13-23, 2002.

HAMMOND, C. R. **The Elements Handbook of Chemistry and Physics.**, ED. D.R. Lide, USA, CRC Press, 1998.

KURTZ, R. S. et al. Outdoor Rating Conditions for Photovoltaic Modules and Systems. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, n. 62, p. 379-391, 2000.

LIN, G. Photovoltaic in the year 2025. *Hydrogen Energy*, n. 25, p. 807-811, 2000.

MME – MINISTÉRIO DAS MINAS DE ENERGIA. **Balço Energético Nacional.** Sinopse 2001. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/ben2002/>

NANN S.; EMERY, K. Spectral Effects on PV- Device Rating. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, n.27, p. 189,216, 1992.

OLIVEIRA, S. H. F. **Geração Distribuída de Eletricidade:** inserção de edificações fotovoltaicas conectadas à rede no estado de São Paulo. São Paulo, 2002.

PINHEIRO S.; PINHEL,A. **A conservação de energia elétrica:** entre o aumento de consumo e estrangulamento da oferta. XVI SNTPEE, Grupo IV, STE II, Campinas, Outubro, 2001.

RODRIGUES, C. **Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída:** o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RÜTHER, R. et al. **High Performance Ratios of a Double-Junction a-Si BIPV Grid-Connected Installation After Five Years of Continuous Operation in Brazil.** In: ^{3rd} World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka- Japan, 2003.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil.** Editora UFSC/LABSOLAR Florianópolis, 2004.

RÜTHER, R et al. **Performance Results of the First Grid Connected, Thin Film PV Installation in Brazil** :High Performance Ratios Over Six Years of Continuous Operation. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Paris, França, 2004.

SANYO SOLAR ARK. Disponível em: <http://www.sanyo.com/industrial/solar/>

SICK, F. et al. **Photovoltaics in Buildings: A Design Handbook for Architects and Engineers.** London, 1996.